Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 35, 1, 2023. (87-106)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

VIV Control in the Flow over a Circular Cylinder Using an Axial Magnetic Field

Research Article

Amir Aslan Mosaferi[1], Mostafa Esmaeili[2], Amir hossein Rabiee[3]

DOI: 10.22067/JACSM.2022.76843.1122

1. Introduction

Vortex-induced vibration (VIV) is a frequently reported phenomenon in nature and engineering technologies. The vibration in "locking" region cause fatigue and damage to various structures such as marine structures, tall buildings, etc. As a result, a considerable endeavor has been done to control and suppress the VIV. Vibration suppression can be done through the active (open loop and closed loop) and the passive control methods. The existence of a sensor is necessary for the closed-loop active control methods, while in passive methods, the flow is modified without entering energy and external force. In the closed-loop active control methods, the controller input is changed by changing the flow characteristic, but in passive methods, it is often associated with the modification of the structure's geometry and can be intrusive and non-intrusive. The control device should be connected to the considered structure in numerous methods of controlling the flow-induced vibrations. The magnitude of vibrations and instability may be amplified if the flow around the structure is interrupted due to the connection of the control device (or control actuator) with the structure.

The fact that the actuator is not connected to the structure is one benefit of employing the magnetic field to suppress the VIV. Recently, the impact of applying a magnetic field in the stream-wise and transverse directions (x and y) on the flow-induced motion of a circular cylinder was numerically evaluated by Mosafari et al. They concluded that unlike the magnetic field perpendicular to the flow direction, the application of the magnetic field in the flow direction at reduced velocities greater than 5 not only does not reduce the vibrations, but also leads to an increase the vibrations amplitude.

In this research, numerical simulations were used to evaluate the fluid flow around a circular cylinder placed on an elastic support when the external magnetic field is acting in the z direction of the coordinate axis. The purpose of the study is to determine whether installing magnets perpendicular to the cylinder's axis (in the z direction) can effectively decrease and suppress vibrations. This point is valuable from a practical standpoint since the method of arranging magnets to apply magnetic fields in some directions may be impractical. The influence of magnetic field intensity (increasing Stuart number) on VIV reduction is also addressed in the present study.

2. Modeling and Numerical Solution Method

The rigid cylinder containing diameter D is placed on the elastic support in this research and can oscillate freely in longitudinal and transverse directions. Before the vibration onset, the center of the cylinder matches up to the origin of the coordinates. It is impacted by a uniform flow with free-stream velocity of U_∞. Figure 1 schematically depicts the computational domain and the applying magnetic field. This investigation only considers the magnetic field perpendicular to the xy-plane (in the z-direction).

Ansys Fluent software and the finite volume method are used to numerically solve the unsteady, incompressible continuity and momentum equations in each time step. To apply the impacts of the magnetic field in the z-direction employing the UDF, a source term was incorporated into the momentum equations. Figure 2 shows a square region with a structured grid surrounding the cylinder and a region with a unstructured triangular grid surrounding the circular areas make up the various configurations of the computational grid.

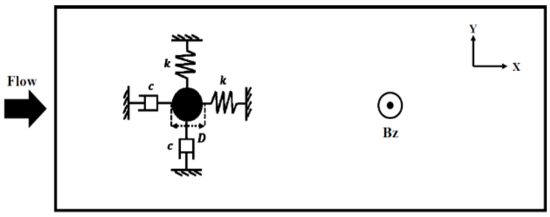


Figure 1. Computational domain in the flow over an elastically supported circular cylinder impacted by an axial magnetic field.

*Manuscript received, May 23, 2022, Revised, August 16, 2022, Accepted, November 26, 2022.

[1] MSc, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

[2] Corresponding author. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran. **Email**: m.esmaeili@khu.ac.ir.

[3] Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

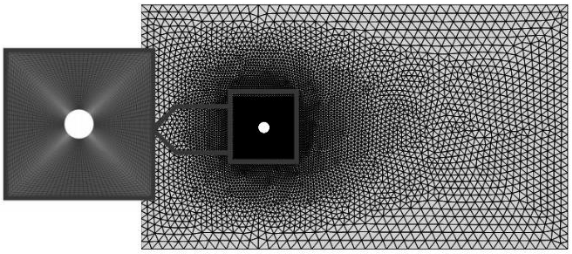


Figure 2. A close-up view of the region around the cylinder for various computational grids

3. Results

Figure 3 shows the variations of Y_{max} in terms of reduced velocity for the various magnetic field intensities applied in the z direction. In addition, the findings for the $N = 0$ are provided for the comparison. The vibrations were controlled appropriately at all reduced velocities, as shown in this figure, by applying the B_z and intensifying the magnetic field.

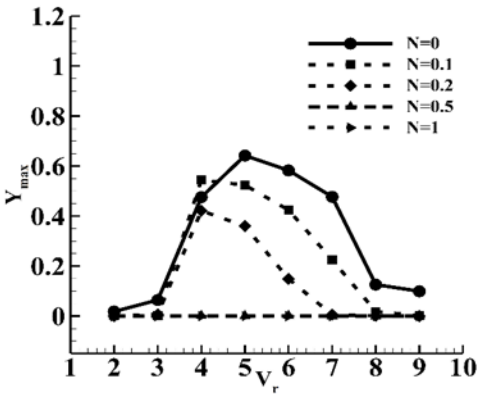


Figure 3. The impact of intensifying the z-direction magnetic field (increasing the Stuart number) on the maximum of transverse vibration amplitude

4. Discussion

In the present study, the impact of a uniform magnetic field perpendicular to xy-plane (z-direction) on the active control of VIV of a circular cylinder placed on an elastic support. The cylinder is rigid and capable of free vibration in the X and Y directions. The most significant finding of the present fluid-structure interaction modeling is that decreasing the cylinder's transverse displacement at all reduced velocities was achieved by the magnetic field intensification in the z-direction. Additionally, the findings of the frequency response diagrams demonstrated that although the application of the magnetic field was able to decrease the cylinder's displacement range, it had little impact on the frequency response.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

دانشگاه فردوسی مشهد

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

کنترل ارتعاشات ناشی از گردابه در جریان حول استوانه دایروی با استفاده از میدان مغناطیسی محوری*

مقاله پژوهشی

امیر اصلان مسافری(۱) مصطفی اسماعیلی(۲) امیرحسین ربیعی(۳)

DOI: 10.22067/JACSM.2022.76843.1122

چکیده در مطالعه حاضر مشخصات ارتعاشات ناشی از گردابه سیال هادی جریان الکریسیته حول استوانه قرار گرفته بر بستر الاستیک به صورت عددی بررسی شده است. جریان سیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت در راستای محور استوانه بوده تا کارایی این روش کنترل فعال حلقه باز در کاهش ارتعاشات ناشی از گردابه سازه مورد ارزیابی قرار گیرد. به منظور تحلیل این مسئله دو طرفه تعامل سازه و سیال، روش عددی حجم محدود برای حل معادلات پیوستگی، مومنتوم حاکم بر جریان سیال و روش انتگرال صریح برای حل معادلات حرکت سازه صلب استفاده شده است. شبیه سازی‌ها به ازای سرعت‌های کاهش یافته ۲ تا ۹ و مقادیر مختلف عدد استورات انجام شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد، اثربخشی میدان بسیار خوب بوده و ارتعاش عرضی و طولی به صورت کامل (٪۱۰۰) کاهش یافته است. برای تمام سرعت‌های کاهش یافته، با افزایش قدرت میدان مغناطیسی، رفته‌رفته روند ریزش گردابه‌ها متوقف شده تا جایی‌که به طور کلی یک دنباله متقارن تشکیل شده و با عبور از شدت میدان مغناطیسی بحرانی حتی دنباله گردابه متقارن نیز ناپدید می‌شود.

واژه‌های کلیدی ارتعاشات القایی ناشی از گردابه، تعامل سازه و سیال، میدان مغناطیسی، شبیه‌سازی عددی.

VIV suppression in the flow over a circular cylinder using axial magnetic field

Amir Aslan Mosaferi Mostafa Esmaeili Amir Hossein Rabiee

Abstract *The present study numerically evaluates vortex-induced vibration (VIV) for an electrically conductive fluid around a cylinder on an elastic support. The flow is subjected to a uniform magnetic field in the z-direction to evaluate the VIV attenuation performance of this open-loop active control method. To analyze this fluid-structure interaction (FSI) problem, the finite volume method (FVM) was employed based on the SIMPLE algorithm to solve the governing continuity and momentum equations of the fluid flow and an explicit integration method to solve the motion equations of the rigid structure. Simulations were carried out at reduced velocities of 2-9 and different Stuart numbers. The simulation results demonstrated that the magnetic field was significantly effective and wholly (100%) suppressed transverse and longitudinal VIVs. A rise in the magnetic field magnitude eliminated vortex shedding for all the reduced velocities, leading to a symmetric wake. The symmetric vortex even disappeared above the critical Stuart number.*

Key Words Vortex-Induced Vibration, Fluid-structure interaction (FSI), Magnetic field, Numerical simulation.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۳/۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۹/۵ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران.

(۳) استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک.

Email: m.esmaeili@khu.ac.ir

مقدمه

ارتعاشات القایی گردابه، یک پدیده مرسوم در طبیعت و کاربردهای مهندسی بوده و می‌تواند در شرایطی که پدیده «قفل شدگی» و «تشدید» رخ دهد، باعث خستگی و آسیب بسیاری از سازه‌ها مانند سازه‌های دریایی، ساختمان‌های بلند، دودکش‌ها، دسته لوله‌ها در مبدل‌های حرارتی و غیره شود. بنابراین، تلاش‌های گسترده‌ای برای کنترل و کاهش ارتعاشات ناشی از گردابه صورت گرفته است. از جمله این اقدامات می‌توان به کنترل غیرفعال و کنترل فعال (حلقه باز و حلقه بسته) اشاره کرد. در روش‌های فعال، کنترل از طریق تزریق انرژی خارجی به جریان صورت می‌گیرد در حالی که در روش‌های غیر فعال، جریان بدون ورود انرژی و نیروی خارجی اصلاح می‌شود. در روش‌های کنترل فعال حلقه بسته، وجود سنسور الزامی و ورودی کنترلر با تغییر حالت جریان عوض می‌شود اما در روش‌های غیر فعال اغلب با تصحیح هندسه سازه همراه بوده و می‌توانند مداخله‌گرانه یا غیر مداخله‌گرانه باشند [5-1]. این روش‌ها نسبت به روش‌های فعال کم‌هزینه‌تر و ساده‌تر بوده ولی با این حال باعث تغییر نیروها و ممان‌های وارد بر سازه شده و قابلیت تطبیق با تغییر شرایط جریان را دارا نیستند [6]. برخلاف روش‌های کنترل غیر فعال، روش‌های فعال در برابر تغییرات شرایط جریان و محیط به راحتی انطباق پیدا می‌کنند و بدون نیاز به اصلاح هندسه، ارتعاشات ناشی از گردابه را به شکل مؤثری کنترل می‌کنند. از این رو، قابلیت تطبیق‌پذیری در برابر تغییرات شرایط جریان، تنظیم‌پذیری آسان برای دست‌یابی به اثر بهینه و انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات مربوط به مشخصات سازه منجر شده است که مطالعات مختلفی به کنترل فعال جریان بپردازند [7]. رویکردهای رایجی چون تزریق مومنتوم به جریان در اطراف استوانه [1,8]، کنترل به روش لایه مرزی متحرک [9]، استوانه‌های در حال چرخش و نوسان [12-10]، نیروهای کنترلی مخالف [17-13] و کنترل حرارتی با استفاده از گرانش [20-18] از جمله روش‌های رایج کنترل فعال محسوب می‌شوند. کنترل ارتعاشات القایی گردابه با استفاده از روش تزریق مومنتوم در جریان با عدد رینولدز پایین حول استوانه قرار گرفته بر بستر الاستیک توسط ونگ و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است [21]. در روش مورد استفاده آنها، یک جفت جت مکش در جلو و یک جفت جت در پشت استوانه بر روی سطح سازه قرار می‌گیرند. آنها از هر دو روش کنترلی حلقه باز و حلقه بسته برای کنترل ارتعاشات القایی گردابه استوانه دایروی استفاده کردند. آنها دریافتند که در روش کنترل حلقه باز، کارایی روش مورد استفاده در کنترل ارتعاشات از روش‌های مکش و دمش خالص بیشتر است. همچنین در مورد روش کنترل حلقه باز، آنها نتیجه گرفتند که کنترل ارتعاشات، مستقل از موقعیت سنسور است. کورکیچکو و مینقینی، به صورت آزمایشگاهی کاهش ارتعاش ناشی از گردابه با استفاده از روش کنترل لایه مرزی مرز متحرک را در اعداد رینولدز ۱۶۰۰ تا ۷۵۰۰ مورد ارزیابی قرار دادند [9]. در این روش کنترل فعال حلقه بسته، کنترل ارتعاشات از طریق قرار گرفتن دو استوانه کوچک چرخان در لایه مرزی حول استوانه اصلی صورت می‌گیرد تا جدایش لایه مرزی به تأخیر بیفتد. آنها نتیجه گرفتند نسبت به حالت بدون کنترل، استفاده از این روش منجر به کاهش ضریب درگ متوسط، کاهش فرایند تشکیل گردابه‌های فن کارمن و در نتیجه کاهش قابل ملاحظه ارتعاشات عرضی ناشی از گردابه می‌گردد. نکته قابل ملاحظه این است که اساس هر دو روش کنترل فعال استفاده شده در مراجع [8,9,21,22]، کنترل ارتعاشات القایی گردابه‌ها، از طریق کاهش قدرت آنها در دنباله استوانه حاصل می‌شود. حال آنکه روش دیگر برای دور شدن از ناحیه تشدید، منحرف کردن فرکانس ریزش گردابه از فرکانس طبیعی سازه به جای تضعیف قدرت گردابه است. دو و وسان، با استفاده از این مفهوم، از طریق نوسانات چرخشی استوانه دایروی، ارتعاشات القایی گردابه‌ها را کنترل کردند [10]. آنها نتیجه گرفتند با انتخاب مقدار مناسب برای سرعت و فرکانس چرخشی، می‌توان ارتعاشات سازه را به کمتر از یک درصد قطر استوانه کاهش داد. وان و پاتنایک، جریان سیال هم‌راستا با نیروی گرانش حول استوانه دایروی داغ قرار گرفته بر یک بستر الاستیک را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند [23]. آنها نتیجه گرفتند که در این روش کنترل فعال حلقه باز، با افزایش پارامتر کنترل گرمایی (عدد ریچاردسون) دامنه ارتعاشات عمود بر جریان کاهش یافته و حتی با تجاوز از یک مقدار ریچاردسون بحرانی، ارتعاشات به صورت کامل کاهش می‌یابد. اخیراً اسماعیلی و ربیعی با استفاده از یک روش کنترل حلقه بسته، بر اساس اعمال نیروی مخالف، کاهش ارتعاش ناشی از گردابه استوانه دایروی در اعداد رینولدز ۱۷۰۰ تا ۱۳۰۰۰ را به صورت عددی مورد بررسی قرار داده‌اند [24]. آنها با استفاده از روش (TDE-iPID) به عنوان

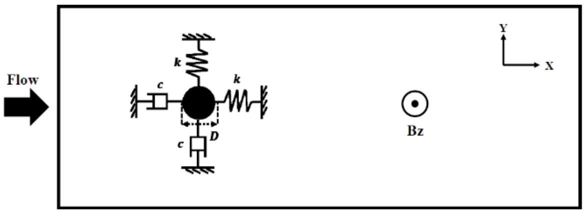
استراتژی کنترل و مدل‌سازی آشفتگی با استفاده از (URANS-K-W-SST) نتیجه گرفتند که دامنه عرضی و طولی ارتعاشات در سرعت کاهش یافته ۵ (بیشینه ارتعاشات در ناحیه قفل شدگی) به صورت کامل (۱۰۰٪) کاهش می‌یابد. یکی از روش‌های غالب در کنترل فعال جریان حول اجسام بلافی شکل، دستکاری کردن دنباله جریان و در نتیجه، مهار تشکیل و ریزش گردابه از طریق اعمال نیروهای الکترومغناطیسی به جریان است. آرتانا و همکاران، دو الکترود که بر روی سطح استوانه ثابت قرار گرفته را در مسیر جریان تعبیه کردند و با اعمال جریان DC به محرک‌های الکتروهیدرودینامیکی یک لایه پلاسما در مجاورت سطح استوانه ایجاد کردند [25]. آنها نتیجه گرفتند که اعمال نیروی الکتریکی باعث افزایش مومنتوم سیال مجاور دیواره، کوچک شدن ناحیه جدایش و در نتیجه متوقف کردن فرایند ریزش گردابه می‌گردد. کرافورد و کارنیداکیس، تأثیر میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی یکنواخت بر جریان سیال هادی جریان الکتریکی حول یک استوانه و یک نیم‌استوانه در اعداد رینولدز ۱۰۰ تا ۵۰۰ را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند [25]. آنها دریافتند با اعمال نیروی لورانتس (ناشی از اعمال میدان‌های الکترو مغناطیسی)، جریان و در نتیجه آن ریزش گردابه کنترل گشته و در عین حال نیروی درگ حول استوانه افزایش می‌یابد. کنترل ریزش گردابه در جریان حول استوانه ثابت، با استفاده از تکنیک مگنتوهیدرودینامیک توسط یوون و همکاران [26]، وییر و همکاران [27]، بواند و همکاران [28]، لی و همکاران [29] مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به تأثیر کاهش نیروی لورانتس بر فرایند ریزش گردابه، کنترل VIV استوانه دایروی با استفاده از اعمال میدان‌های الکترومغناطیسی دور از انتظار نیست. ژی و همکاران، کنترل حلقه باز VIV استوانه دایروی را با قرار دادن مگنت و الکترود بر روی سطح استوانه و تولید نیروی لورانتس به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند [30]. کنترل الکترومگنتیک ارتعاشات یک درجه آزادی ناشی از گردابه استوانه دایروی با استفاده از روش عددی تاوایی- خط جریان توسط ژانگ و همکاران، مورد بررسی قرار گرفته است [31]. آنها ترتیب قرارگیری آهن‌ربا و الکترود را طوری در نظر گرفتند (بر اساس مطالعه وییر و همکاران [27]) که نیروی لورانتس به موازات سطح استوانه گسترش یافته و با دور شدن از سطح استوانه (افزایش شعاع) به صورت نمایی کاهش یابد. آنها دریافتند که نیروی لورانتس میدان، منجر به کاهش نیروی درگ شده در حالی که نیروی لورانتس دیواره، باعث متقارن شدن جریان حول استوانه و کاهش نیروی نوسانی لیفت می‌گردد. در ادامه این مطالعه، ژانگ و همکاران، نشان دادند با استفاده از نیروی متقارن لورانتس، ارتعاشات دو درجه آزادی سیلندر کاملاً کاهش می‌یابد [32].

اخیراً مسافری و همکاران [33] تأثیر اعمال میدان مغناطیسی در جهت جریان و عمود بر جهت جریان (راستای x و y) را بر ارتعاشات ناشی از جریان حول استوانه را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند بر خلاف میدان مغناطیسی عمود بر جهت جریان، اعمال میدان مغناطیسی در جهت جریان در سرعت‌های کاهش یافته بزرگتر از ۵ نه تنها موجب کاهش ارتعاشات نمی‌گردد بلکه منجر به افزایش و بهبود ارتعاشات نیز می‌شود. از مزایای بهره‌گیری از میدان مغناطیسی برای کاهش ارتعاشات ناشی از جریان، می‌توان به عدم اتصال عملگر به سازه مورد نظر اشاره نمود. در بسیاری از روش‌های کنترل ارتعاشات ناشی از جریان که به دو روش کنترل غیر فعال (بدون استفاده از منبع انرژی خارجی)، و کنترل فعال (با استفاده از منبع انرژی خارجی) تقسیم‌بندی می‌شوند، ابزار کنترلی می‌بایست به سازه مورد نظر متصل شود. اتصال ابزار کنترلی (یا عملگر کنترلی) با سازه در بعضی از موارد به خودی خود می‌تواند باعث بر هم خوردن جریان حول سازه، و به تبع آن افزایش دامنه ارتعاشات و ناپایداری شود. در مطالعه حاضر جریان حول استوانه قرار گرفته بر بستر الاستیک، تحت تأثیر میدان مغناطیسی خارجی (در جهت عمود بر صفحه دوبعدی جریان یا در راستای z محور مختصات) به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از مطالعه فعلی بررسی کارایی قرارگیری مگنت‌ها عمود بر محور استوانه (راستای z) در کاهش و فرونشاندن کامل ارتعاشات است (مانند آنچه در مرجع [33] در مورد میدان مغناطیسی در جهت عمود بر جریان (راستای y) نتیجه گرفته شد). این مطلب از نقطه‌نظر کاربردی می‌تواند مهم باشد، زیرا نحوه چیدمان مگنت‌ها برای اعمال میدان مغناطیسی در بعضی جهات ممکن است از نظر عملی ناممکن باشد. در ضمن، بررسی جهت قرارگیری مگنت‌ها برای کنترل حلقه بسته بسیار مهم می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر، نویسندگان دریافتند که اگر سیستم کنترل حلقه بسته مطابق با جهت قرارگیری مگنت‌ها به گونه‌ای

که در پژوهش [1] استفاده شده بود (در جهت جریان) پیاده‌سازی شود، سیستم کنترل عملکرد مناسبی نخواهد داشت و حتی ممکن است منجر به ناپایداری شود. در نقطه مقابل، نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که با اعمال میدان در جهت محور استوانه، سیستم کنترل حلقه بسته بهترین عملکرد ممکن را خواهد داشت و در بدترین حالت پایداری را برقرار می‌سازد. در مطالعه حاضر، عدد رینولدز جریان برابر با مقدار ثابت ۱۵۰ بوده و سرعت کاهش یافته بین ۲ تا ۹ تغییر می‌کند. تأثیر شدت میدان مغناطیس (افزایش عدد استوارت) بر کاهش ارتعاشات، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به مرور بر منابع انجام شده، اصلی‌ترین نوآوری‌های مطالعه حاضر که در مطالعات پیشین دیده نشده است، کنترل و کاهش دو درجه آزادی استوانه دایروی با استفاده از میدان مغناطیسی یکنواخت عمود بر صفحه جریان و در راستای z، می‌باشد.

مدل‌سازی و روش حل عددی

در مطالعه حاضر تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت بر مشخصات ارتعاشات ناشی از گردابه در جریان تراکم‌ناپذیر و آرام حول استوانه دایروی مورد بررسی قرار گرفته است. استوانه صلب با قطر D بر روی یک تکیه‌گاه الاستیک قرار داشته و می‌تواند آزادانه در راستای طولی و عرضی حرکت کند. مرکز استوانه، پیش از شروع ارتعاش منطبق بر مبدأ مختصات بوده و تحت تأثیر جریان آزاد با سرعت U_∞ است. در شکل (۱) ناحیه محاسباتی و نحوه اعمال میدان‌های مغناطیسی به صورت شماتیکی نشان داده شده است. در این مطالعه فقط میدان مغناطیسی عمود بر صفحه جریان (در جهت z) در نظر گرفته شده است. هدف از اعمال میدان مغناطیسی، بررسی امکان کنترل ارتعاشات است. جریان حول استوانه به ترتیب در جهت طولی x، عرضی y ناحیه محاسباتی مستطیلی $-10D \le x \le 25D$ و $-10D \le y \le 10D$ را پوشش می‌دهد. فاصله بین مرز ورودی تا مرکز استوانه (L1) و فاصله مرکز استوانه تا مرز خروجی (L0) به ترتیب 10D و 25D در نظر گرفته شده‌اند. در مطالعه حاضر سیال عامل آب بوده و چگالی (ρ)، ویسکوزیته (μ) در نظر گرفته شده است. بر این اساس، عدد رینولدز جریان $Re = \frac{\rho U_\infty D}{\mu}$، برابر ۱۵۰ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ ناحیه محاسباتی جریان حول استوانه دایروی قرار گرفته بر بستر الاستیک تحت تأثیر میدان مغناطیسی در جهت جریان عمود بر صفحه جریان

معادلات حاکم

با توجه به توضیحات ذکر شده، معادلات بقای جرم، مومنتوم برای سیال غیرقابل تراکم با قابلیت رسانایی الکتریکی که در تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار دارد، به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot v = 0 \qquad (۱)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho (v \cdot \nabla) v = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + j \times B \qquad (۲)$$

در معادلات فوق، v بردار سرعت سیال، t زمان، P فشار سیال و ترم $j \times B$ معرف نیروی لورانتس است که در آن j، بردار چگالی جریان الکتریکی و B بردار میدان مغناطیسی هستند. معادله القای مغناطیسی از قانون اهم و معادله ماکسول به دست آمده است. این معادله اتصال بین میدان جریان و میدان مغناطیسی را فراهم می‌کند. به منظور تحلیل مگنتوهیدرودینامیک در مطالعه حاضر، از تقریب رینولدز مغناطیسی کوچک استفاده شده است. طبق این فرض، بردار چگالی جریان الکتریکی، بر حسب میدان سرعت و میدان مغاطیسی با توجه به قانون اهم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$j = \sigma (E + v \times B) \qquad (۳)$$

در معادله فوق σ، ضریب رسانایی الکتریکی سیال و E میدان الکتریکی هستند که معادله ماکسول را ارضا می‌کنند. بعدسازی معادلات حاکم اعداد بی‌بعد هارتمن (Ha) و استوارت (N) حاصل شده که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Ha = \frac{\text{Magnetic force}}{\text{Viscous force}} = \sqrt{\frac{\sigma B_0{}^2 D}{\mu}} \qquad (٤)$$

$$N = \frac{\text{Magnetic force}}{\text{Inertia force}} = \frac{\sigma B_0{}^2 D}{\rho U_\infty} = \frac{Ha^2}{Re} \qquad (۵)$$

هنگامی که استوانه دایروی قرار گرفته بر بستر الاستیک در معرض جریان آزاد قرار می‌گیرد، می‌تواند تحت تأثیر نوعی از حرکات نوسانی قرار گیرد. چون منبع این نوسانات، ریزش گردابه ها و تشکیل خیابان گردابه‌های ون کارمن در ویک استوانه می باشد، به آن ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه اطلاق می‌شود. در این مطالعه، استوانه‌های دایروی می‌توانند آزادانه در جهات x و y نوسان کنند. معادلات حاکم بی‌بعد برای حرکت دینامیکی استوانه دایره‌ای که با تکیه‌گاه الاستیک که به صورت سیستم‌های جرم-فنر-دمپر ساده مدل شده‌اند به شکل زیر بیان شده‌اند:

$$\ddot{X} + \frac{4\pi\xi}{V_r}\dot{X} + \frac{4\pi^2}{{V_r}^2}X = \frac{2C_D}{\pi m^*} \quad (۶)$$

$$\ddot{Y} + \frac{4\pi\xi}{V_r}\dot{Y} + \frac{4\pi^2}{{V_r}^2}Y = \frac{2C_L}{\pi m^*} \quad (۷)$$

که در معادلات فوق، Y ، $\dot{Y}$ و $\ddot{Y}$ به ترتیب نشـــان دهنده جابه‌جایی عرضـی، سـرعت و شـتاب غیربعدی سـیلندر اسـت. همچنین X، $\dot{X}$ و $\ddot{X}$ نشـــان دهنده همان مقادیر مرتبط با حرکت جریانی در راسـتای طولی اسـت. همچنین m^* ، ξ ، V_r، C_D و C_L به ترتیب نسبت جرم، نسبت میرایی سازه، سرعت کاهش یافته، ضریب درگ و ضریب لیفت را نشان می‌دهند. این پارامترهای بدون بعد به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$m^* = \frac{4m}{\pi\rho D^2} \quad (۸)$$

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (۹)$$

$$V_r = \frac{U}{f_n D} \quad (۱۰)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 D} \quad (۱۱)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 D} \quad (۱۲)$$

که m ، c، k و f_n به ترتیب جرم معادل در واحد طول، میرایی معادل، سفتی فنر معادل و فرکانس طبیعی نوسانگر است. همچنین F_D و F_L نیروهای درگ و لیفت را که بر روی نوسانگر به معنای مخالف و عمود بر جهت حرکت اعمال می‌کنند، نشان می‌دهد.

حل عددی

در این بخش، فرایند حل عددی معادلات حاکم بر جریان حول استوانه قرار گرفته بر بستر الاستیک تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت (در جهت z)، مورد بررسی قرار گرفته است. جریان سیال در اطراف استوانه، آرام (عدد رینولدز ۱۵۰) بوده و خواص فیزیکی آن به گونه‌ای انتخاب شده که عدد رینولدز ثابت بماند. دلیل استفاده از محدوده اعداد رینولدز در این مطالعه و پژوهش-های مشابه [34-36]، محدودیت‌های مربوط به توان محاسباتی می‌باشد. در محدوده اعداد رینولدز کمی بالاتر، هسته گردابه‌ها آشفته و دارای ماهیت سه‌بعدی خواهد شد که برای حل میدان جریان می‌بایست از مدل‌های آشفتگی بهره گرفت. در صورت استفاده از فضای سه‌بعدی، تعداد مش‌ها بسیار بالا خواهد شد که در نتیجه آن زمان محاسبات بسیار افزایش می‌یابد. این مسئله به خصوص در مدل‌سازی ارتعاشات ناشی از جریان که از روش حل جابه‌جایی مش نیز استفاده می‌شود، بسیار پیچیده می‌شود. در نتیجه، در صورت بهره‌گیری از مدل‌های آشفته، به دلیل زمان محاسباتی بسیار بالا نمی‌توان اثر پدیده‌های مختلف بر رفتار جریان-سازه‌ای سیستم ارتعاشی مورد مطالعه را ارزیابی نمود. یکی از روش‌های به کار گرفته شده برای حل این مشکل، بهره-گیری از مدل‌های حل جریان آرام و استفاده از مدل‌های دوبعدی است. برای بهره‌گیری از این روش، محدوده اعداد رینولدز حتماً می‌بایست پایین در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است پارامترهای فیزیکی و هندسی مسئله در محدوده اعداد رینولدز پایین به گونه-ای انتخاب می‌شود که تمامی پدیده‌های شناخته شده در محدوده اعداد رینولدز بالا مانند قفل‌شدگی فرکانسی، در اعداد رینولدز پایین نیز مشاهده شود.

در هر تکرار گام زمانی، معادلات پیوستگی، مومنتوم با استفاده از روش حجم محدود و نرم‌افزار فلوئنت به صورت عددی حل می‌شوند. علاوه بر آن، از الگوریتم سیمپل برای کوپل معادلات فشار و مومنتوم استفاده شده است. برای اعمال اثرات میدان مغناطیسی در راستای z با استفاده از تابع کاربرUDF، ترم چشمه به معادلات مومنتوم اضافه شده است. به منظور بررسی اعتبار روش فوق، معادلات حاکم بر جریان به صورت کوپل با معادلات مغناطیسی کامل که در ماژول MHD ارائه شده است، حل و تغییر محسوسی در نتایج مشاهده نشد. در نتیجه به منظور کاهش زمان و هزینه‌های محاسباتی، تمام شبیه‌سازی‌ها با استفاده از تقریب رینولدز مغناطیسی کوچک انجام گرفته و عملاً تأثیر میدان

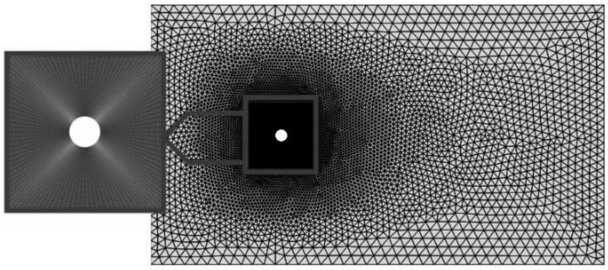
مغناطیسی و نیروی لورانتس از طریق ترم چشمه به معادلات مومنتوم اعمال شده است. از آنجایی که در نرم‌افزار فلوئنت مستقیماً نمی‌توان حرکت سازه قرار گرفته بر بستر الاستیک را مدل‌سازی کرد، معادلات حرکت سازه در تابع کاربر که به زبان برنامه‌نویسی C نوشته شده (این UDF به کد اصلی نرم‌افزار فلوئنت کوپل شده است) از طریق انتگرال‌گیری صریح حل شدند. از آنجا که با یک مسئله دو طرفه تعامل سازه و سیال روبه‌رو هستیم حلگرهای سازه و سیال با هم مرتبط بوده و به صورت کوپل حل می‌شوند. مقادیر نیروی لیفت و درگ حول استوانه که در سمت راست معادلات سازه مورد نیاز است، در هر گام زمانی در نرم‌افزار فلوئنت حل می‌شوند. از طرف دیگر، با حل معادلات حرکت استوانه، موقعیت مکانی و مؤلفه‌های سرعت سازه و هم‌چنین پیکربندی شبکه به روز شده و فرایند اندرکنش دو طرفه بین سازه و سیال تکمیل می‌گردد. گسسته‌سازی معادلات مومنتوم از طریق روش بالادست مرتبه دوم انجام گرفته و معادله تصحیح فشار با استفاده از روش مرتبه دوم گسسته‌سازی شده است. به منظور افزایش سرعت فرایند حل عددی، برای کوپلینگ میدان‌های سرعت و فشار از روش گام جزیی به همراه روش پیشروی زمانی غیر تکراری (Non-iterative transient advancement (NITA)) استفاده می‌شود. این الگوی عددی با استفاده از تکرار در هر گام زمانی، خطای splitting را تا مرتبه Δt^2 کاهش می‌دهد. به منظور بررسی عدم تأثیر گام زمانی بر نتایج حل عددی، به ازای گام‌های زمانی مختلف، جریان حول استوانه ثابت به صورت گذرا شبیه‌سازی گردید. همان طور که در جدول (۱) مشخص است، با انتخاب گام زمانی ۰/۰۱ حل عددی مستقل از گام زمانی بوده و همچنین اختلاف ناشی از نتایج عددی با مقدار ۰/۱۱ (عدد استروهال فرکانس ریزش گردابه در جریان حول استوانه ثابت در عدد رینولدز ۱۵۰) کمتر از یک درصد است. بنابراین در محاسبات از این گام زمانی استفاده شده است. همچنین، محاسبات بر روی رایانه شخصی با رم ۸ گیگابایتی و پردازنده مرکزی Intel Core i7 انجام شده است. زمان پردازش لازم برای هر ۱۰۰ گام زمانی (1s) با استفاده از یک هسته از پردازنده مرکزی برابر با 50s بوده و بنابراین برای یک شبیه‌سازی با ۵۰۰۰۰ تکرار (500s) حدود ۷ ساعت به طول می‌انجامد.

جدول ۱ انتخاب گام زمانی بهینه مرتبط با حداقل خطای محاسبه شده در عدد استروهال جریان حول یک استوانه ثابت در Re=150

Δt	$St_{Re=150}$	%|error|
0.075	0.1032	6.18
0.05	0.1059	3.72
0.01	0.1110	0.9
0.005	0.1107	0.63

استقلال حل از شبکه محاسباتی و اعتبارسنجی

در این بخش، ابتدا مشخصات شبکه محاسباتی معرفی شده و بعد از بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، نتایج حل عددی اعتبارسنجی می‌گردند. شبکه محاسباتی استفاده شده برای شبیه‌سازی جریان حول استوانه قرار گرفته بر بستر الاستیک در در شکل (۲) نشان داده شده است. شبکه محاسباتی در پیکربندی های مختلف، از دو نوع شبکه مختلف تشکیل شده است. ناحیه مربعی با شبکه باسازمان حول استوانه و ناحیه با شبکه بی‌سازمان مثلثی حول نواحی دایروی. استراتژی مش متحرک استفاده شده در این مطالعه به گونه‌ای است که در هر تکرار زمانی، شبکه دور استوانه بدون تغییر شکل بوده و با استوانه حرکت می‌کنند اما شبکه مثلثی، حول این نواحی دایروی دارای حرکت و تغییر شکل هستند. بدون تغییر شکل ماندن شبکه باسازمان حول استوانه‌ها، منجر به افزایش دقت محاسبات نیروهای لیفت و درگ می‌گردد. با توجه به توضیحات ذکر شده در مورد مشخصات شبکه محاسباتی، استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی مورد استفاده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در جدول (۲) روند تغییر مقدار ضریب درگ متوسط و مقدار بیشینه ضریب لیفت با ریز شدن شبکه (افزایش شبکه) برای جریان با عدد رینولدز ۱۵۰، $m^* = 2$ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، با افزایش تعداد المان‌ها از ۲۰۰۰۰ به ٦۰۰۰۰ تغییری در نتایج دیده نمی‌شود و بنابراین شبکه محاسباتی با ۲۰۰۰۰ المان برای تمامی محاسبات آتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۲ شبکه محاسباتی مختلف به همراه نمای نزدیک از ناحیه حول استوانه

جدول ۲ بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی

بیشینه ضریب لیفت (Cl)	ضریب درگ متوسط(Cd)	تعداد سلول‌ها
0.5838	2.32	9000
0.5699	2.2880	15000
0.5282	2.2240	20000
0.5226	2.2160	60000

پس از بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، جهت اطمینان از درستی روش حل عددی، لازم است که نتایج شبیه‌سازی اعتبارسنجی گردد. در مطالعه حاضر دو مورد اعتبارسنجی در نظر گرفته شده است. در مورد اول، جریان سیال با عدد رینولدز ۱۰۰ حول استوانه ساکن که تحت تأثیر میدان مغناطیسی ثابت شبیه‌سازی شده است. در جدول (۳) مقایسه نتایج حل عددی با مطالعات لی و همکاران [29] برای استوانه ساکن تحت تأثیر میدان یکنواخت به ازای پنج مقدار مختلف عدد استورات (N) نشان داده شده است. همان طور که در این جدول مشخص است، نتایج مطالعه حاضر با دقت مناسبی با نتایج لی و همکاران [29] هم‌خوانی دارد.

به عنوان مورد دوم اعتبارسنجی، ارتعاشات القایی ناشی از گردابه برای استوانه یک‌بعدی در نظر گرفته شده و نتایج مطالعه حاضر با نتایج مطالعات عددی امینی [37] مقایسه شده است. بدین منظور، استوانه فقط در جهت عرضی قابلیت ارتعاش داشته و جرم بی‌بعد آن برابر با ۲ بوده و سرعت کاهشی بین ۳ تا ۸ تغییر می‌کند. در جدول (٤)، تغییرات بیشینه ارتعاشات عرضی استوانه، با نتایج عددی امینی و همکاران مقایسه شده است. همان طور که از این شکل نشان می‌دهد، بیشینه ارتعاشات عرضی استوانه به دست آمده از مطالعه حاضر کاملاً منطبق بر نتیجه امینی و همکارن است.

جدول ۳ مقایسه متوسط ضریب درگ به دست آمده از مطالعه حاضر با نتایج لی و همکاران برای جریان حول استوانه ثابت در عدد رینولدز ۱۰۰

متوسط ضریب درگ		
مطالعه حاضر	لی و همکاران [29]	N
1.28	1.19	0.01
1.35	1.38	0.05
1.48	1.43	0.1
2.12	2.13	0.5
2.69	3.02	1

جدول ٤ مقایسه بیشینه جابه‌جایی عرضی بی‌بعد به دست آمده از مطالعه حاضر با نتایج امینی و همکاران [37]

بیشینه جابه‌جایی عرضی (Y_{max})		
امینی و همکاران [37]	مطالعه حاضر	بیشینه جابه‌جایی
0.0749	0.0627	$V_r = 3$
0.5800	0.5825	$V_r = 4$
0.5430	0.5440	$V_r = 5$
0.4800	0.4799	$V_r = 6$
0.3819	0.3740	$V_r = 7$
0.0731	0.0912	$V_r = 8$

نتایج

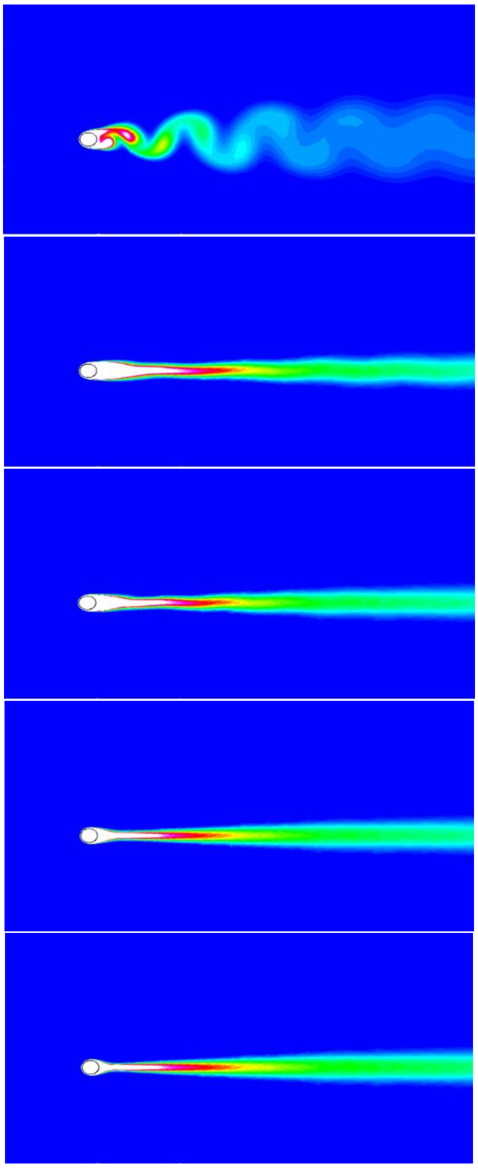
در مطالعه حاضر، تأثیر میدان مغناطیسی خارجی بر مشخصات ارتعاشات ناشی از گردابه در جریان سیال هادی الکریسیته، حول استوانه قرار گرفته بر بستر الاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت بوده و عمود بر صفحه جریان و در راستای z در نظر گرفته شده است. استوانه دارای ضریب فنریت یکسان در هر دو جهت جریان و عمود بر آن بوده، جرم بی‌بعد آن (m^*) برابر با مقدار ثابت ۲ و به منظور دستیابی به حداکثر ارتعاشات، مقدار ضریب میرایی برابر صفر در نظر گرفته شده است. همچنین، عدد رینولدز جریان برابر ۱۵۰ در نظر گرفته شده و با فرکانس طبیعی سازه به شکلی تغییر می‌کند که مقدار سرعت کاهش یافته بین ۲ تا ۹ متغیر باشد. نتایج شبیه‌سازی

در ابتدا برای سه سرعت کاهش یافته $V_r = 3$ (پیش از ورود به ناحیه قفل شدگی)، $V_r = 5$ (بیشینه ارتعاشات در ناحیه قفل شدگی) و $V_r = 7$ (شاخه پایینی ناحیه قفل شدگی) مورد ارزیابی کامل قرار می‌گیرد. سپس کمیت‌هایی چون ضریب درگ، لیفت، ارتعاشات عرضی و طولی برای تمامی مقادیر سرعت‌های کاهشی مقایسه شده و تأثیر میدان مغناطیسی بر کنترل ارتعاشات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

قبل از ورود به ناحیه قفل شدگی ($V_r = 3$)

در شکل (۳)، کانتورهای ورتیسیتی در وضعیتی که دامنه نوسانات به حالت ماندگار رسیده است، به ازای اعمال میدان مغناطیسی با قدرت‌های مختلف $0 \le N \le 1$ نشان داده شده‌اند. در حالت بدون کنترل و در $N = 0$، مشاهده می‌شود که کانتورهای ورتیسیتی در پشت استوانه به صورت متناوب تولید می‌گردند. به محض اعمال میدان مغناطیسی مشاهده می‌گردد که ریزش گردابه در پشت استوانه متوقف می‌شوند. با افزایش بیشتر قدرت میدان مغناطیسی ناحیه دنباله در پشت استوانه کوچکتر می‌شود.

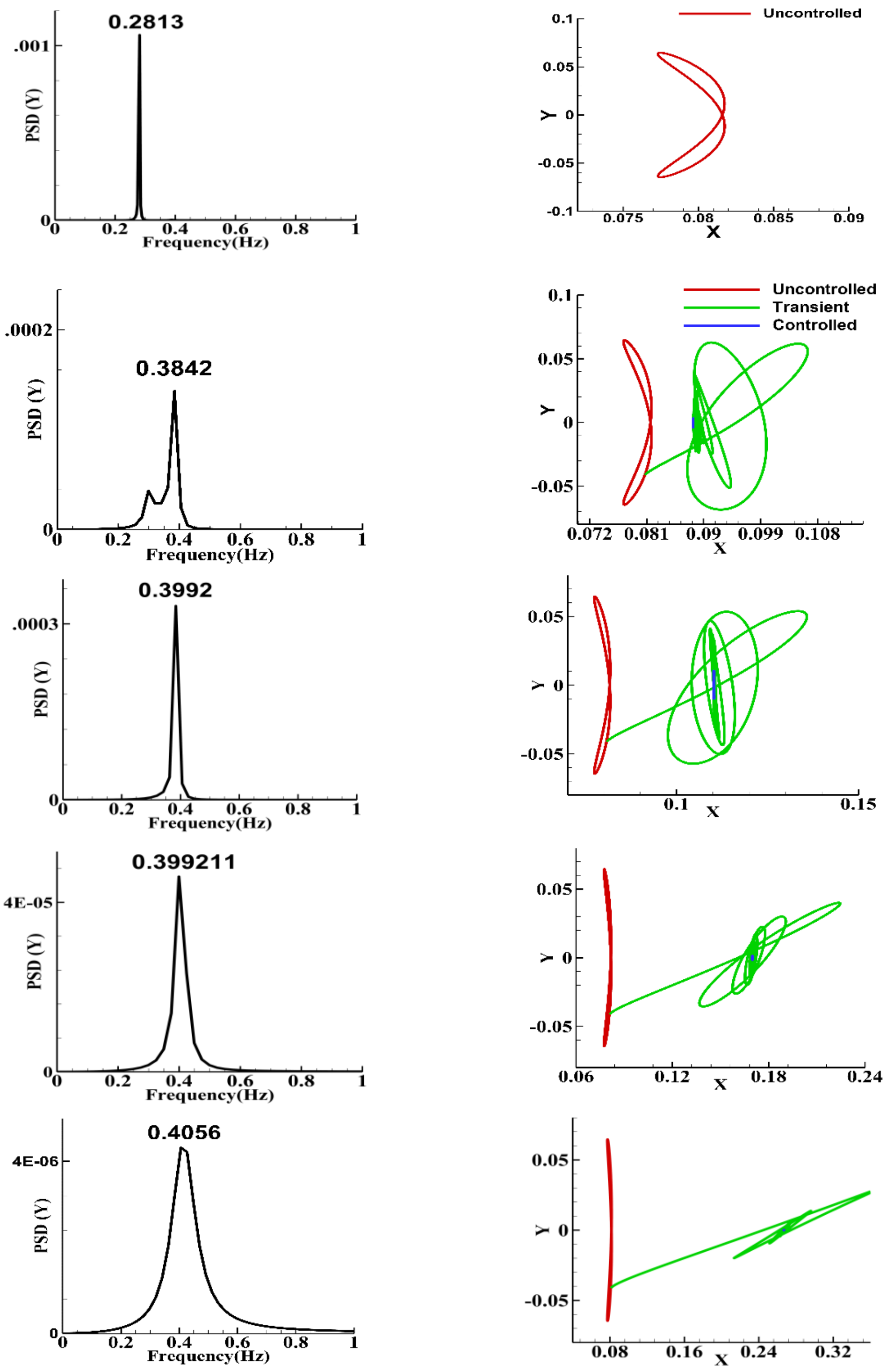
از آنجایی که علاوه بر نوسان غالب استوانه که در جهت y است، استوانه در جهت x نیز ارتعاش دارد، برای نشان دادن نحوه اثرپذیری نوسانات استوانه در راستای و همچنین نحوه حرکت استوانه با تغییر میدان مغناطیسی، در شکل (٤-الف)، نمودار y برحسب x، که به نمودار هشتی نیز معروف است، رسم شده است که در آن استوانه در دو جهت همزمان ارتعاش می‌کند و بعد از اعمال میدان و عبور از حالت گذرا، دامنه ارتعاشات در راستای عرضی کم شده و به حالت پایدار می‌رسد. در این شکل برای $V_r = 3$ نمودار هشتی شکل برای هنگامی که فرایند کنترل شروع می‌شود به ازای قدرت‌های مختلف میدان مغناطیسی آورده شده است. شکل (٤-ب) نمودار پاسخ فرکانسی (چگالی طیف توانی بر حسب فرکانس نوسانات عرضی استوانه) را به ازای اعمال میدان مغناطیسی با قدرت‌های مختلف در $V_r = 3$ نمایش می‌دهد. در این شکل، عدد نمایش داده شده در هر نمودار فرکانسی بیانگر فرکانس ارتعاش عرضی استوانه می‌باشد. همان‌طور که مشخص است با افزایش قدرت میدان مغناطیسی، مقدار فرکانس نوسانات به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا کرده است.



شکل ۳ توزیع لحظه‌ای ورتیسیته و حالت توسعه یافته زمانی تحت تأثیر افزایش قدرت میدان مغناطیسی در $V_r = 3$

در ادامه، برای بررسی اینکه آیا اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت قادر خواهد بود تغییر مؤثری در ارتعاشات القایی ناشی از گردابه استوانه در حالتی که دامنه نوسانات به مقدار بیشینه خود رسیده است ایجاد کند، سیستم کنترل مغناطیسی جریان در وضعیت حالت ماندگار به طور ناگهانی روشن می‌شود. برای همین منظور، شکل (۵) جابه‌جایی در راستای y استوانه را قبل و بعد از اعمال میدان مغناطیسی B_z در سرعت کاهش یافته $V_r = 3$ نشان می‌دهد. در سرعت کاهش یافته $V_r = 3$ که مربوط به ابتدای ناحیه قفل شدگی می‌باشد، اعمال میدان مغناطیسی توانسته

است دامنه حرکت استوانه را کاهش دهد. با افزایش قدرت میدان، ارتعاشات عرضی به خوبی کنترل شده و به صفر می‌رسد.



N = 0

N = 0.1

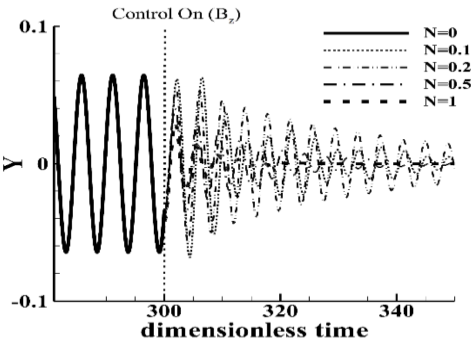
N = 0.2

N = 0.5

N = 1

(ب) (الف)

شکل ٤ نمودار (الف) هشتی‌شکل، (ب) منحنی چگالی طیف توانی(PSD) بر حسب فرکانس در $V_r = 3$ و به ازای قدرت‌های مختلف میدان

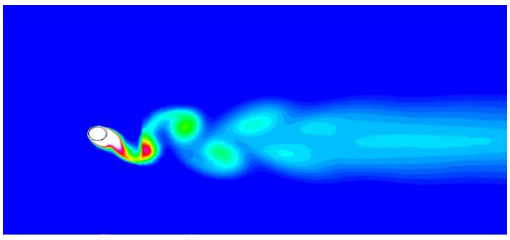


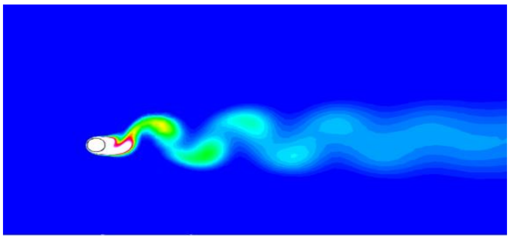
شکل ۵ تغییرات زمانی جابه‌جایی استوانه در راستای y در $V_r = 3$

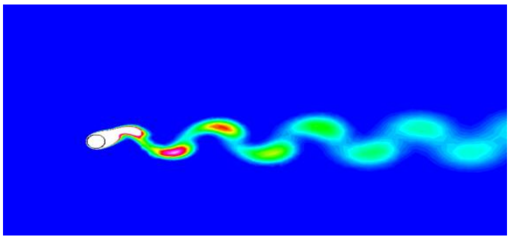
بیشینه دامنه ارتعاشات عرضی در ناحیه قفل شدگی ($V_r = 5$)

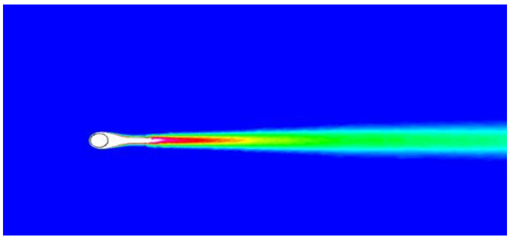
در شکل (٦) کانتورهای ورتیسیتی در $V_r = 5$ (که منطبق بر بیشینه دامنه ارتعاشات عرضی در ناحیه قفل شدگی است) به ازای اعمال B_z با قدرت‌های مختلف نشان داده شده است. از مقایسه توزیع ورتیسیتی در $V_r = 5$ با $V_r = 3$ (شکل ۳) می‌توان دریافت در $V_r = 5$ فاصله عرضی بین گردابه‌ها کاهش یافته و قدرت ریزش گردابه‌ها بیشتر شده و بنابراین دامنه ارتعاشات به بیشینه مقدار خود رسیده است. پس از اعمال میدان مغناطیسی از $N = 0.5$ به بعد مشاهده می‌گردد که ارتعاشات دریشت استوانه به خوبی کنترل شده تا جایی که با اعمال بیشترین قدرت میدان $N = 1$، به طور کامل کنترل شده است.

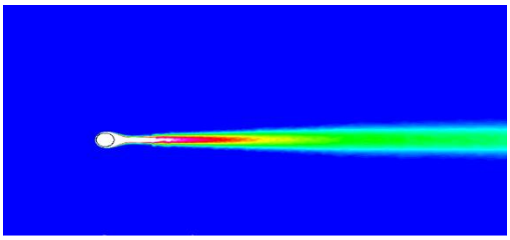
در شکل (۷–الف) مسیر حرکت استوانه (نمودار نوسانات عرضی بر حسب نوسانات طولی) برای $V_r = 5$ به ازای مقادیر مختلف قدرت میدان مغناطیسی نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، در $N = 0$، استوانه یک مسیر هشتی‌شکل با دامنه نوسانات طولی و عرضی بالا را طی می‌کند و پس از اعمال میدان مغناطیسی و به ازای $N \geq 0.5$، پس از طی کردن حالت گذرا، استوانه به صورت کامل کنترل شده و دامنه نوسانات کاهش می‌یابد. شکل (۷–ب) نمودار پاسخ فرکانسی (چگالی طیف توانی بر حسب فرکانس نوسانات عرضی استوانه) را به ازای اعمال میدان مغناطیسی با قدرت‌های مختلف، در $V_r = 5$ نمایش می-دهد. در این سرعت کاهش یافته، استوانه در اوج ناحیه قفل شدگی فرکانسی قرار دارد که این به معنای تطابق فرکانس ریزش گرابه‌ها با فرکانس طبیعی استوانه می‌باشد. در اینجا دیده می‌شود اعمال میدان مغناطیسی، اگرچه توانسته است دامنه جابه‌جایی استوانه را کاهش دهد ولی تأثیر چندانی در پاسخ فرکانسی نداشته است. در واقع، دلیل اصلی کاهش دامنه جابه‌جایی استوانه توقف روند ریزش گردابه‌ها است.


N = 0

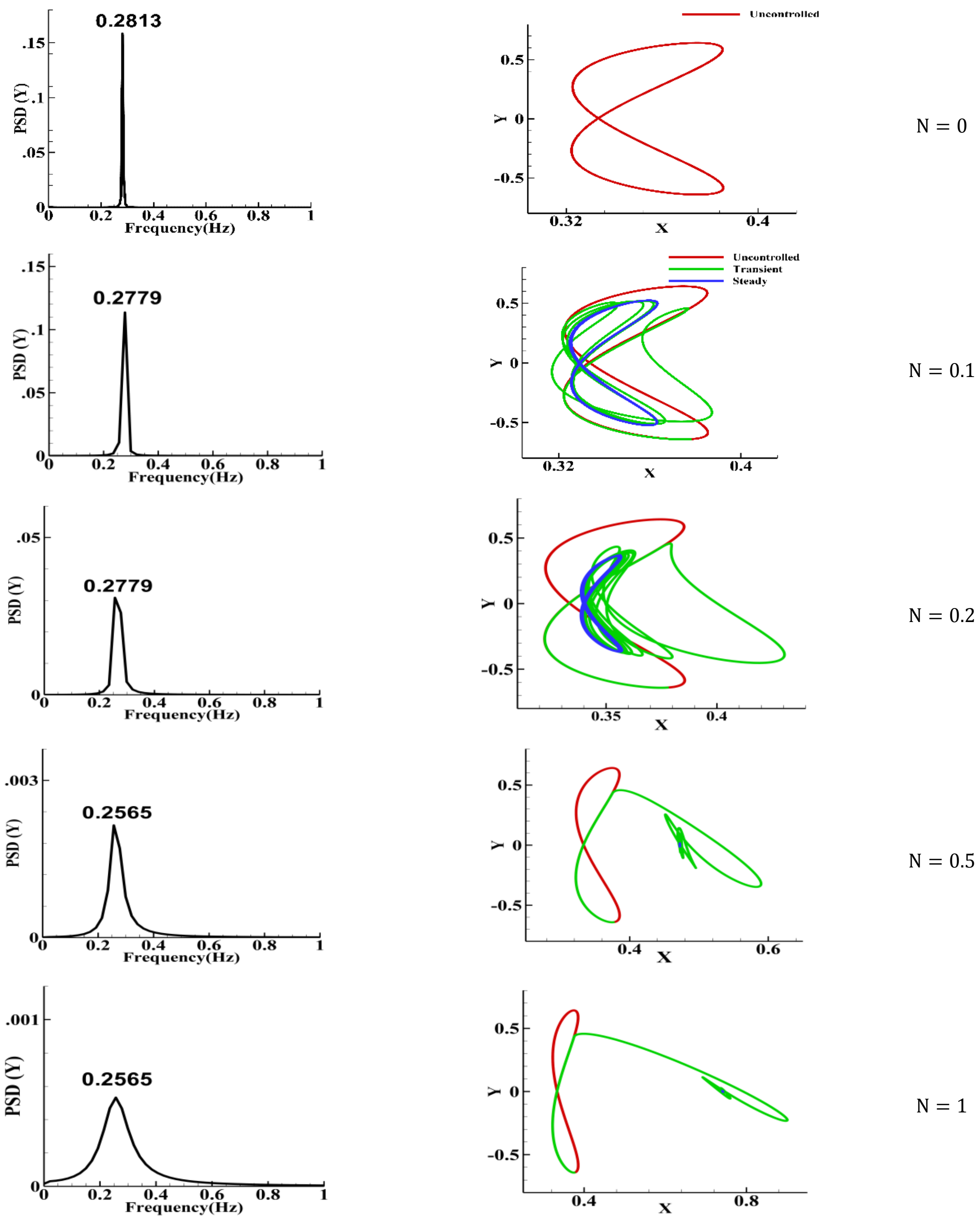

N = 0.1


N = 0.2


N = 0.5


N = 1

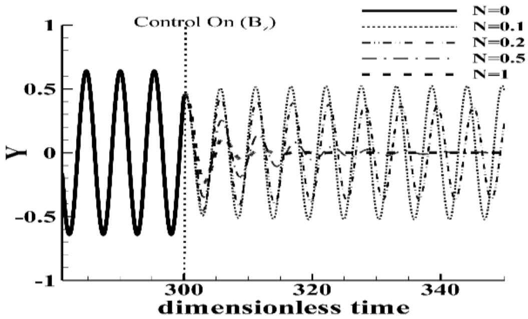
شکل ٦ توزیع لحظه‌ای ورتیسیته در حالت توسعه یافته زمانی تحت تأثیر افزایش قدرت میدان مغناطیسی در $V_r = 5$



(ب) (الف)

شکل ۷ (الف) نمودار هشتی‌شکل، (ب) منحنی چگالی طیف توانی (PSD) بر حسب فرکانس در $V_r = 5$ و به ازای قدرت‌های مختلف میدان

همان طور که از تاریخچه زمانی ارتعاشات عرضی برای $V_r = 5$ در شکل (۸) مشخص است، روش کنترلی در کاهش دامنه ارتعاشات برای میدان‌های با قدرت $N = 0.1$ و $N = 0.2$، مؤثر عمل نکرده است. با این حال با افزایش بیشتر قدرت میدان، دامنه حرکت به خوبی کاهش پیدا کرده، به طوری که در $N = 0.5$ ، ارتعاشات استوانه به صورت کامل کنترل شده است.



شکل ۸ تغییرات زمانی جابه‌جایی استوانه در راستای y، قبل و بعد از اعمال میدان مغناطیسی در $V_r = 5$

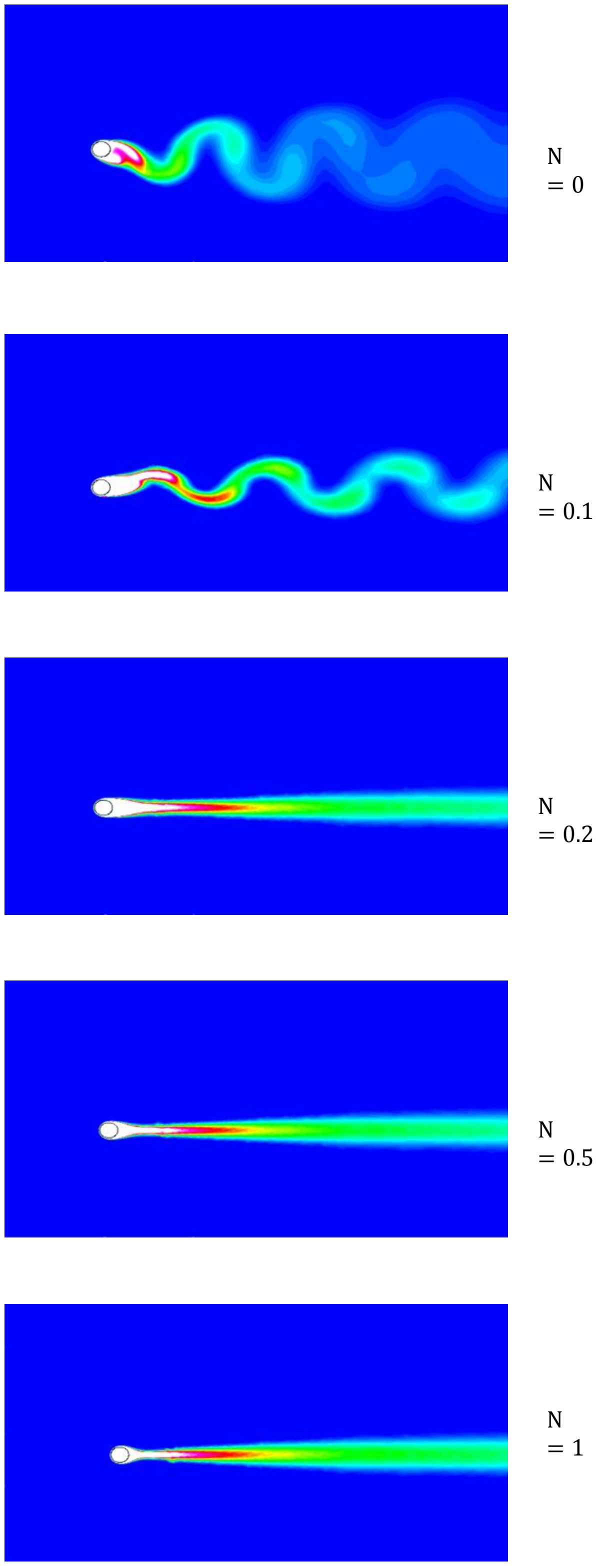
شاخه پایینی ناحیه قفل شدگی $(V_r = 7)$

کانتورهای ورتیسیتی در $V_r = 7$ (که منطبق بر شاخه پایینی ناحیه قفل شدگی است) به ازای اعمال مقادیر مختلف قدرت میدان مغناطیسی در شکل (۹) نشان داده شده است. در حالت بدون کنترل $(N = 0)$، مشاهده می‌شود که کانتورهای ورتیسیتی در پشت استوانه به صورت متناوب تولید می‌گردند و نسبت به $V_r =$ 5 قدرت ریزش گردابه و به تبع آن دامنه ارتعاشات عرضی کمتر شده است. همچنین با اعمال میدان مغناطیسی و به ازای $N \geq 0.2$ ریزش گردابه در پشت استوانه به خوبی کنترل می‌گردد.

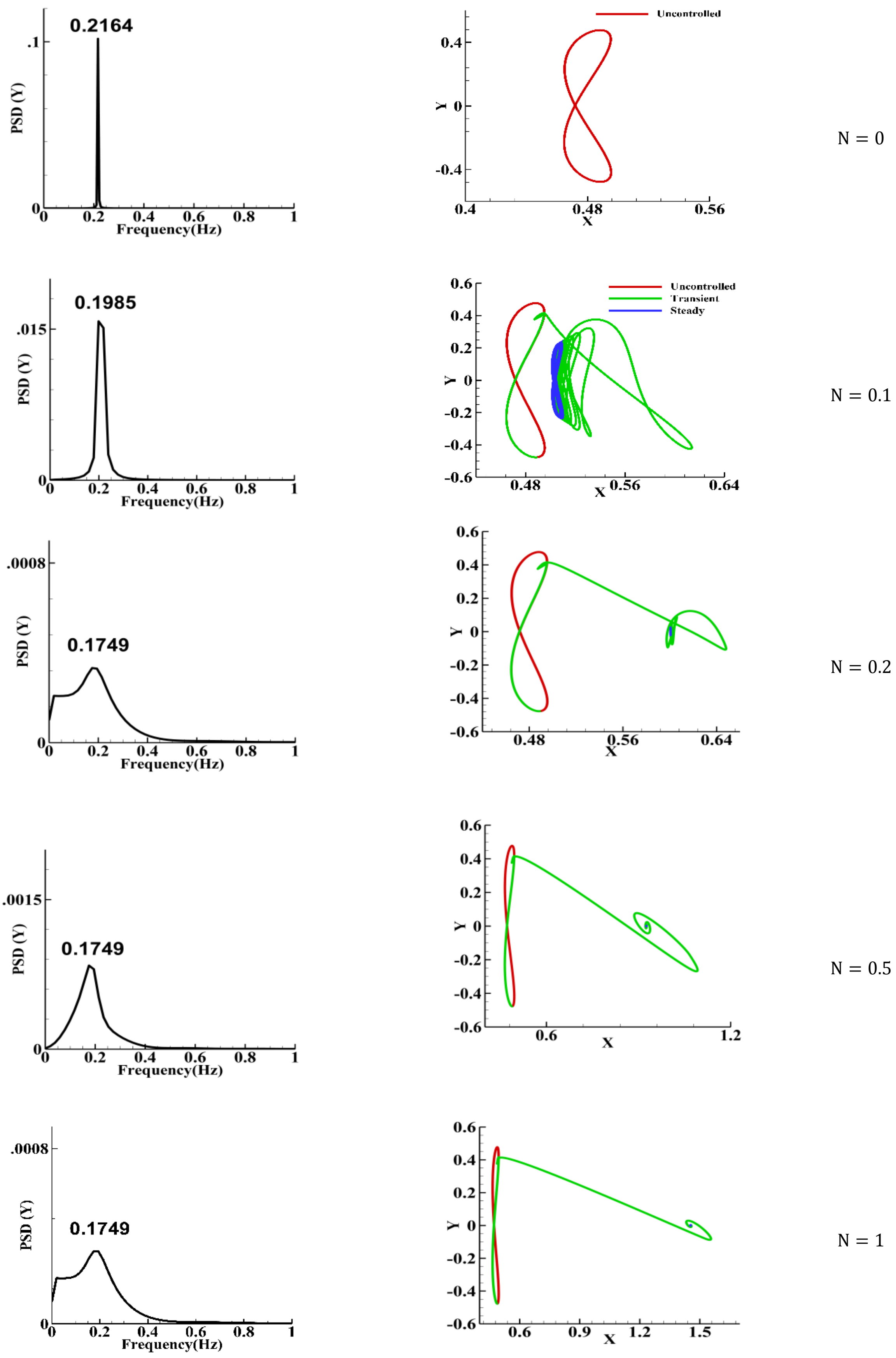
در شکل (۱۰- الف) نمودار خط سیر ا ستوانه قبل و بعد از اعمال میدان مغناطیسی نشان داده شده است.

حرکت هشتی‌شکل استوانه با افزایش قدرت میدان مغناطیسی (به ازای $N \geq 0.2$)، پس از طی کردن حالت گذرا، به صورت کامل کنترل و دامنه نوسانات کاهش می‌یابد. شکل (۱۰-ب) نمودار پاسخ فرکانسی (چگالی طیف توانی بر حسب فرکانس نوسانات عرضی استوانه) را به ازای اعمال میدان مغناطیسی با قدرت‌های مختلف، در $V_r = 7$ نمایش می‌دهد. در این سرعت کاهش یافته دیده می‌شود که افزایش قدرت میدان مغناطیسی باعث کاهش فرکانس نوسانات استوانه شده است.

در شکل (۱۱) تاریخچه زمانی ارتعاشات در $V_r = 7$ قبل و بعد از شروع کنترل مشخص شده است. مشاهده می‌گردد که اعمال میدان مغناطیسی به ازای تمام قدرت‌های میدان به جز $N = 0.1$، در کاهش ارتعاشات عرضی، مؤثر عمل کرده و توانسته است آن را به خوبی کنترل کند.

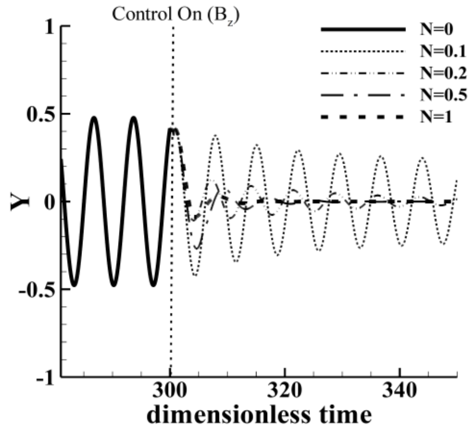


شکل ۹ توزیع لحظه‌ای ورتیسیته در حالت توسعه یافته زمانی تحت تأثیر افزایش قدرت میدان مغناطیسی در $V_r = 7$



(ب) (الف)

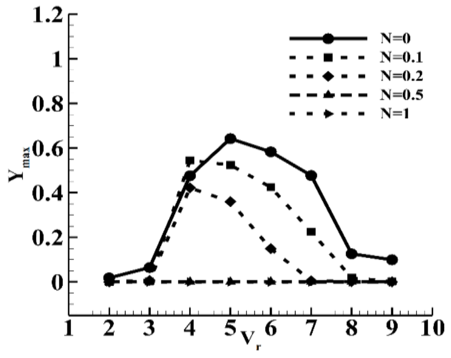
شکل۱۰ (الف) نمودار هشتی شکل، (ب) منحنی چگالی طیف توانی(PSD) بر حسب فرکانس در $V_r = 7$ و به ازای قدرت‌های مختلف میدان



شکل ۱۱ تغییرات زمانی جابه‌جایی استوانه در راستای y قبل و بعد از اعمال میدان مغناطیسی در $V_r = 7$

مقایسه کمی مشخصات ارتعاشات در سرعت‌های کاهشی مختلف

شکل (۱۲) تغییرات Y_{max} را بر حسب سرعت کاهش یافته برای شدت میدان‌های مغناطیسی مختلف در جهت اعمالی z نشان می‌دهد. همچنین به منظور مقایسه، نتایج مربوط به حالت $N = 0$ نیز آورده شده است. همان طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، با اعمال میدان درجهت B_z و افزایش قدرت میدان مغناطیسی، ارتعاشات به شکل بسیار مناسبی در تمامی سرعت‌های کاهش یافته کنترل شده است. به منظور مقایسه شدت میدان لازم برای کنترل کامل ارتعاشات در سرعت‌های کاهش یافته مختلف، معیاری با عنوان عدد استورات بحرانی تعریف می‌گردد. طبق این معیار، N_{cr} برای هر سرعت کاهش یافته، عدد استوراتی است که در آن مقدار دامنه ارتعاشات عرضی به ۱٪ حالت بدون میدان مغناطیسی برسد. در جدول (۵) حداقل قدرت میدان مغناطیسی که منجر به کاهش کامل نوسانات استوانه می‌شود (عدد استوارت بحرانی) لیست شده است. همان طور که مشخص است، برای کاهش کامل نوسانات توسط B_z، مقدار N_{cr} برای V_r های ٤، ٥ و ٦ نسبت به سایر سرعت‌های کاهش یافته بیشتر است. در سایر سرعت‌های کاهش یافته می‌توان با قدرت کمتر میدان مغناطیسی ($N = 0.1$) ارتعاشات ناشی از گردابه را کاهش داد. در تمام سرعت‌های کاهش یافته، با افزایش قدرت میدان مغناطیسی تا عدد استوارت بحرانی ریزش گردابه‌ها و ارتعاش القایی از آن متوقف می‌شود.



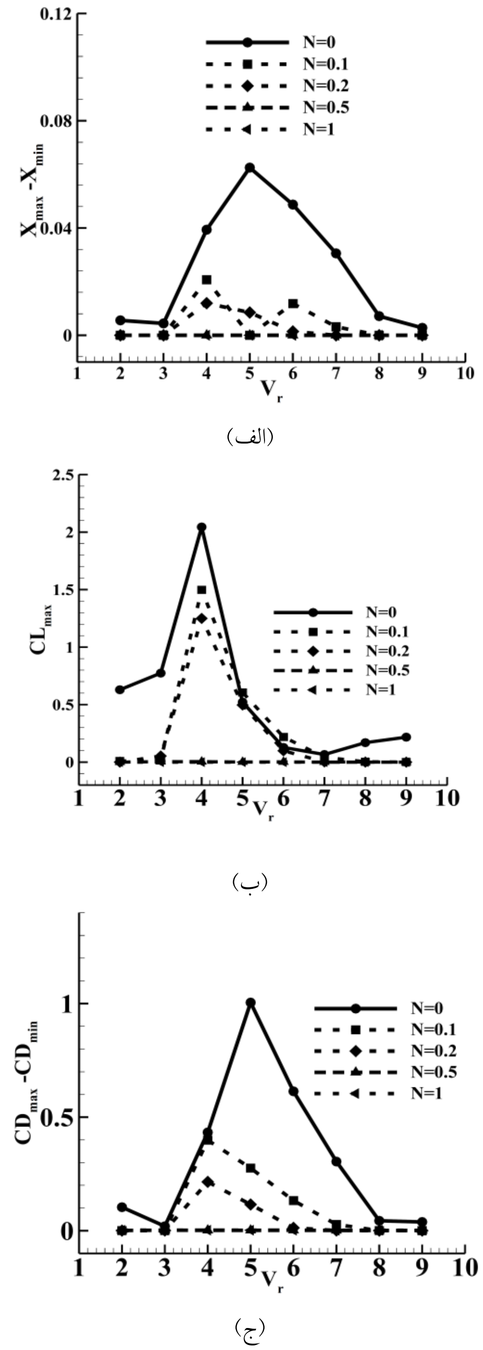
شکل ۱۲ اثر افزایش قدرت میدان مغناطیسی در جهت z (افزایش عدد استوارت) بر تغییرات بیشینه دامنه ارتعاش عرضی

جدول ۵ مقدار بحرانی عدد استورات در سرعت‌های کاهش یافته مختلف برای میدان مغناطیسی در جهت z

B_z	N بحرانی
$V_r = 3$	0.1
$V_r = 4$	0.1
$V_r = 5$	0.5
$V_r = 6$	0.5
$V_r = 7$	0.2
$V_r = 8$	0.1
$V_r = 9$	0.1

شکل (۱۳–الف) تغییرات بیشینه نوسان در راستای x (حرکت طولی)، شکل (۱۳–ب) تغییرات بیشینه ضریب لیفت، شکل (۱۳–ج) تغییرات بیشینه نوسان ضریب درگ را بر حسب مقادیر مختلف سرعت‌های کاهش یافته و عدد استوارت (مقادیر مختلف قدرت میدان B_z) نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش قدرت میدان، نوسانات طولی به طور کامل کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، بیشینه جابه‌جایی طولی، برای عدد استوارت ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۱ نسبت به حالت بدون میدان در $V_r = 6$ به ترتیب به میزان ۷۵، ۹۷، ۹۹,۹ و ۱۰۰ درصد کاهش یافته است. تغییرات دامنه ناسلت با سرعت کاهش یافته، نیز حاکی از آن است که با افزایش قدرت میدان از $N = 0.1$ تا $N = 1$، بیشینه دامنه نوسانات و همچنین عرض ناحیه قفل شدگی کاهش می‌یابند. همچنین، برای ضرایب لیفت و درگ نیز، مشاهده می‌شود که با افزایش قدرت میدان مغناطیسی در جهت z، بیشینه ضریب لیفت و دامنه نوسانی ضریب درگ به خوبی تا جایی کاهش یافته که برای مقادیر عدد استوارت بزرگتر از ۰/۵ این

کمیت‌ها به سمت صفر میل می‌کنند.



شکل ۱۳ اثر افزایش قدرت میدان مغناطیسی در جهت z (افزایش عدد استوارت) بر تغییرات: الف) بیشینه نوسان در راستای x (حرکت طولی)، ب) بیشینه ضریب لیفت، ج) بیشینه دامنه نوسانی ضریب درگ با سرعت کاهشی

نتیجه گیری

در این مطالعه، تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت در راستای عمود بر صفحه جریان (در راستای z) بر کنترل فعال ارتعاشات ناشی از گردابه حول یک استوانه قرار گرفته بر بستر الاستیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. استوانه صلب بوده و می‌تواند آزادانه در جهات x و y ارتعاش کند. الگوریتم حل عددی سازه سیال از طریق مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی جریان حول استوانه ساکن، تحت تأثیر میدان و ارتعاشات القایی ناشی از گردابه حول استوانه بدون حضور میدان، با نتایج سایر مراجع اعتبارسنجی گردید. محاسبات برای سرعت‌های کاهش یافته ۲ تا ۹ و همچنین مقادیر مختلف عدد استوارت برای میدان مغناطیسی B_z انجام شده است. مهم‌ترین مشاهدات به دست آمده از شبیه‌سازی‌های سیال- جامد به شرح زیر است:

۱. افزایش شدت میدان مغناطیسی در جهت z، جابه‌جایی عرضی استوانه را در تمام سرعت‌های کاهش یافته، کاهش داد. برای کنترل جابه‌جایی عرضی توسط اعمال میدان B_z، حداکثر قدرت میدان لازم برای کاهش کامل ارتعاشات $N = 0.5$ بوده و بنابراین اعمال میدان مغناطیسی در جهت عمود بر صفحه در کنترل و کاهش ارتعاشات القایی ناشی از گردابه حول استوانه با قابلیت نوسان طولی و عرضی کاملاً مؤثر است.

۲. نمودار خط سیر استوانه‌ها در سرعت‌های کاهش یافته ۳، ۵ و ۷ که ترتیب نماینده سه ناحیه مهم پیش از ورود به ناحیه قفل شدگی، بیشینه دامنه ارتعاشات در ناحیه قفل شدگی و شاخه پایینی ناحیه قفل شدگی هستند، نشان می‌دهند که با اعمال میدان مغناطیسی، استوانه‌ها مسیری گذرا را طی کرده و در مقادیر بزرگتر مساوی استوارت بحرانی، در یک نقطه پایدار می‌شوند.

۳. نتایج حاصل از نمودارهای پاسخ فرکانسی نشان می‌دهد، اعمال میدان مغناطیسی اگرچه توانسته است دامنه جابه‌جایی استوانه را کاهش دهد ولی تأثیری چندانی در پاسخ فرکانسی نداشته است. در واقع، توقف روند ریزش گردابه‌ها، دلیل اصلی کاهش دامنه جابه‌جایی استوانه می‌باشد نه تغییر فرکانس ریزش گردابه‌ها.

در ادامه این تحقیق، سعی خواهد شد، با نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر و مقایسه آن با سایر تحقیقات انجام شده، کنترل حلقه بسته (بهره‌گیری از سیگنال فیدبک) جهت محاسبه ولتاژ مورد نیاز برای اعمال میدان مغناطیسی مورد توجه قرار گیرد. در سیستم کنترل حلقه بسته با تکیه بر اطلاعات به دست آمده از

سنسورها، می‌توان با مصرف کمترین میزان انرژی، بیشترین اثر کاهشی را بر ارتعاشات ناشی از جریان اعمال نمود.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

V	سرعت، $\frac{m}{s}$
P	فشار، pa
J	بردار چگالی جریان الکتریکی، Am^{-2}
T	زمان، S
B	بردار میدان مغناطیسی، T
E	میدان الکتریکی، $\frac{V}{m}$
X	جابه‌جایی طولی بی‌بعد
$\dot{X}$	سرعت طولی بی‌بعد
$\ddot{X}$	شتاب طولی بی‌بعد
Y	جابه‌جایی عرضی بی‌بعد
$\dot{Y}$	سرعت عرضی بی‌بعد
$\ddot{Y}$	شتاب عرضی بی‌بعد
m^*	نسبت جرم سازه به سیال
V_r	سرعت کاهش یافته
C_A	نیروی محرک بی‌بعد
C_D	ضریب درگ
C_L	ضریب لیفت

علائم یونانی

τ	دوره تناوب، S
ξ	نسبت میرایی
σ	ضریب رسانش الکتریکی، $\frac{S}{m}$
ρ	چگالی، $\frac{Kg}{m^3}$
μ	ویسکوزیته، Pas

واژه نامه

ارتعاش ناشی از جریان	Vortex-induced vibration
اندرکنش سازه-سیال	Fluid-structure interaction
قفل شدگی	Lock-in
کنترل حلقه باز	Open-loop control
روش حجم کنترل	Finite volume method
میدان مغناطیسی محوری	Axial magnetic field

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] K. Narendran and R. Jaiman, “Effect of near-wake jet on the lock-in of a freely vibrating square cylinder,” *Physics of Fluids,* vol. 31, p. 053603, 2019.

[2] V. Bianchi, L. S. Silva, F. Cenci, S. Hirabayashi, H. Suzuki, and R. T. Gonçalves, “Spoiler plate effects on the suppression of vortex-induced motions of a single circular cylinder,” *Ocean Engineering,* vol. 210, p. 107569, 2020.

[3] P. Li, L. Liu, Z. Dong, F. Wang, and H. Guo, “Investigation on the spoiler vibration suppression mechanism of discrete helical strakes of deep-sea riser undergoing vortex-induced vibration,” *International Journal of Mechanical Sciences,* vol. 172, p. 105410, 2020.

[4] H. Ren, Y. Xu, J. Cheng, P. Cao, M. Zhang, S. Fu, *et al.*, “Vortex-induced vibration of flexible pipe fitted with helical strakes in oscillatory flow,” *Ocean Engineering,* vol. 189, p. 106274, 2019.

[5] H. Zhu, G. Li, and J. Wang, “Flow-induced vibration of a circular cylinder with splitter plates placed upstream and downstream individually and simultaneously,” *Applied Ocean Research,* vol. 97, p. 102084, 2020.

[6] S. Muddada and B. Patnaik, “Active flow control of vortex induced vibrations of a circular cylinder subjected to non-harmonic forcing,” *Ocean Engineering,* vol. 142, Pp. 62-77, 2017.

[7] H. Zhu, T. Tang, H. Zhao, and Y. Gao, "Control of vortex-induced vibration of a circular cylinder using a pair of air jets at low Reynolds number," *Physics of Fluids,* vol. 31, p. 043603, 2019.

[8] F. Yuan, Y. Cao, C. Tu, and J. Lin, "Control of vortex shedding from two side-by-side cylinders using a pair of tangential jets," *AIP Advances,* vol. 10, p. 105129, 2020.

[9] I. Korkischko and J. Meneghini, "Suppression of vortex-induced vibration using moving surface boundary-layer control," *Journal of Fluids and Structures,* vol. 34, Pp. 259-270, 2012.

[10] L. Du and X. Sun, "Suppression of vortex-induced vibration using the rotary oscillation of a cylinder," *Physics of Fluids,* vol. 27, p. 023603, 2015.

[11] A. H. Rabiee and M. Esmaeili, "The effect of externally applied rotational oscillations on FIV characteristics of tandem circular cylinders for different spacing ratios," *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow,* vol. 37, Pp. 2128-2149, 2020.

[12] D. Vicente-Ludlam, A. Barrero-Gil, and A. Velazquez, "Flow-induced vibration control of a circular cylinder using rotational oscillation feedback," *Journal of Fluid Mechanics,* vol. 847, Pp. 93-118, 2018.

[13] P. Carbonell, X. Wang, and Z.-P. Jiang, "On the suppression of flow-induced vibration with a simple control algorithm," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,* vol. 8, Pp. 49-64, 2003.

[14] V. Gattulli and R. Ghanem, "Adaptive control of flow-induced oscillations including vortex effects," *International Journal of Non-Linear Mechanics,* vol. 34, Pp. 853-868, 1999.

[15] S. M. Hasheminejad, A. H. Rabiee, M. Jarrahi, and A. Markazi, "Active vortex-induced vibration control of a circular cylinder at low Reynolds numbers using an adaptive fuzzy sliding mode controller," *Journal of Fluids and Structures,* vol. 50, Pp. 49-65, 2014.

[16] A. Mehmood, A. Abdelkefi, I. Akhtar, A. Nayfeh, A. Nuhait, and M. Hajj, "Linear and nonlinear active feedback controls for vortex-induced vibrations of circular cylinders," *Journal of Vibration and control,* vol. 20, Pp. 1137-1147, 2014.

[17] A. H. Rabiee and M. Esmaeili, "Simultaneous vortex-and wake-induced vibration suppression of tandem-arranged circular cylinders using active feedback control system," *Journal of Sound and Vibration,* vol. 469, p. 115131, 2020.

[18] H. Garg, A. K. Soti, and R. Bhardwaj, "Thermal buoyancy induced suppression of wake-induced vibration," *International Communications in Heat and Mass Transfer,* vol. 118, p. 104790, 2020.

[19] H. Wan, J. A. DesRoches, A. N. Palazotto, and S. S. Patnaik, "Vortex-induced vibration of elliptic cylinders and the suppression using mixed-convection," *Journal of Fluids and Structures,* vol. 103, p. 103297, 2021.

[20] Y. Gao, J. Yang, Y. Xiong, M. Wang, and G. Peng, "Experimental investigation of the effects of the coverage of helical strakes on the vortex-induced vibration response of a flexible riser," *Applied Ocean Research,* vol. 59, Pp. 53-64, 2016.

[21] C. Wang, H. Tang, S. C. Yu, and F. Duan, "Active control of vortex-induced vibrations of a circular cylinder using windward-suction-leeward-blowing actuation," *Physics of Fluids,* vol. 28, p. 053601, 2016.

[22] H. Wang, L. Ding, L. Zhang, Q. Zou, and C. Wu, "Control of two-degree-of-freedom vortex-induced vibrations of a circular cylinder using a pair of synthetic jets at low Reynolds number: influence of position angle and momentum

coefficient," *International Journal of Heat and Fluid Flow,* vol. 80, p. 108490, 2019.

[23]H. Wan and S. S. Patnaik, "Suppression of vortex-induced vibration of a circular cylinder using thermal effects," *Physics of Fluids,* vol. 28, p. 123603, 2016.

[24]M. Esmaeili and A. H. Rabiee, "Active feedback VIV control of sprung circular cylinder using TDE-iPID control strategy at moderate Reynolds numbers," *International Journal of Mechanical Sciences,* vol. 202, p. 106515, 2021.

[25]G. Artana, R. Sosa, E. Moreau, and G. Touchard, "Control of the near-wake flow around a circular cylinder with electrohydrodynamic actuators," *Experiments in Fluids,* vol. 35, Pp. 580-588, 2003.

[26]H. Yoon, H. Chun, M. Ha, and H. Lee, "A numerical study on the fluid flow and heat transfer around a circular cylinder in an aligned magnetic field," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 47, Pp. 4075-4087, 2004.

[27]T. Weier, G. Gerbeth, G. Mutschke, E. Platacis, and O. Lielausis, "Experiments on cylinder wake stabilization in an electrolyte solution by means of electromagnetic forces localized on the cylinder surface," *Experimental Thermal and Fluid Science,* vol. 16, Pp. 84-91, 1998.

[28]M. Bovand, S. Rashidi, J. Esfahani, S. Saha, Y. Gu, and M. Dehesht, "Control of flow around a circular cylinder wrapped with a porous layer by magnetohydrodynamic," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* vol. 401, Pp. 1078-1087, 2016.

[29]J. H. Lee, J. H. Son, and I. S. Park, "Magnetohydrodynamics around a cylindrical wire carrying electric currents," *Journal of Mechanical Science & Technology,* vol. 34, Pp. 1567-1579, 2020.

[30]C. Zhi-Hua, F. Bao-Chun, Z. Ben-Mou, and L. Hong-Zhi, "Open loop control of vortex-induced vibration of a circular cylinder," *Chinese Physics,* vol. 16, p. 1077, 2007.

[31]H. Zhang, B.-c. Fan, Z.-h. Chen, and H.-z. Li, "Numerical study of the suppression mechanism of vortex-induced vibration by symmetric Lorentz forces," *Journal of Fluids and Structures,* vol. 48, Pp. 62-80, 2014.

[32]H. Zhang, M.-k. Liu, Y. Han, M.-y. Gui, J. Li, and Z.-h. Chen, "Suppression mechanism of two-degree-of-freedom vortex-induced vibration by Lorentz forces in the uniform flow," *Computers & Fluids,* vol. 159, Pp. 112-122, 2017.

[33]A. A. Mosaferi, M. Esmaeili, and A. H. Rabiee, "Effect of aligned magnetic field on the 2DOF VIV suppression and convective heat transfer characteristics of a circular cylinder," *International Communications in Heat and Mass Transfer,* vol. 130, p. 105807, 2022.

[34]S. Étienne and D. Pelletier, "The low Reynolds number limit of vortex-induced vibrations," *Journal of Fluids and Structures,* vol. 31, Pp. 18-29, 2012.

[35]S. Choi, H. Choi, and S. Kang, "Characteristics of flow over a rotationally oscillating cylinder at low Reynolds number," *Physics of Fluids,* vol. 14, Pp. 2767-2777, 2002.

[36]S. Singh and S. Mittal, "Vortex-induced oscillations at low Reynolds numbers: hysteresis and vortex-shedding modes," *Journal of Fluids and Structures,* vol. 20, Pp. 1085-1104, 2005.

[37]Y. Amini, S. Akhavan, and E. Izadpanah, "Vortex-induced vibration of a cylinder in pulsating nanofluid flow," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,* vol. 140, Pp. 2143-2158, 2020.